DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE UN PLASMA POR INTERFEROMETRIA DE MICROONDAS

El interferómetro de 2mm del Tokamak TJ-1

por

MARTIN, R. MANERO, F.

JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR

MADRID, 1984

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES

:

A14

PLASMA DENSITY PLASMA DIAGNOSTIC INTERFEROMETRY INTERFEROMETERS MICROWAVES RADIATION. Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Documentación Biblioteca y Publicaciones, Junta de Energía Nuclear, Ciudad Universitaria, Madrid-3, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesauro del INIS para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. Para más detalles con súltese el informe IAEA-INIS-12 (INIS: Manual de Indización) y IAEA-INIS-13 (INIS: Thesauro) publicado por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Este trabajo se ha recibido para su impresión en Julio de 1.984.

Depósito legal nº M-31536-1984

I.S.B.N. 84-505-0374-4

. • . . -

INDICE

1. INTRODUCCION.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA INTERFEROMETRIA DE MICROONDAS

2.1. Introducción.

2.2. Desfasaje introducido por un plasma en una onda electromagnética.

2.3. Determinación del perfil de densidad de un plasma.

3. EL INTERFEROMETRO DE MICROONDAS.

3.1. Descripción general del sistema.

3.2. Principios básicos que determinan su funcionamiento.

3.3. Procesamiento de la señal y determinación del desfasaje.

3.3.1. Circuito detector de cero y conformador.

3.3.2. Circuito contador de franjas.

. 3.3.3. Circuito comparador digital de fase.

3.3.4. Reloj y modulador.

3.4. Dispositivo experimental.

4. BIBLIOGRAFIA.

APENDICE I: El Klystron reflex

APENDICE II: El Anillo Híbrido

~

1. INTRODUCCION.

1

La medida de la distribución de densidad electrónica es uno de los diagnósticos más importantes en el estudio del plasma creado en un di<u>s</u> positivo de confinamiento magnético. Una onda electromagnética que atravi<u>e</u> se el plasma experimentará un desfasaje que dependerá de la densidad media del plasma a lo largo de su recorrido. Si se mide el desfasaje sufrido por la onda a lo largo de diferentes cuerdas de una sección transversal del pla<u>s</u> ma, se podrá determinar la distribución de densidad media, o perfil de dens<u>i</u> dad, en esa sección en un instante determinado de la descarga. Análogamente si el sistema de medida permite determinar el valor del desfasaje en función del tiempo se podrá conocer la variación de la densidad media en un instante determinado, una inversión de Abel de los valores correspondientes a los de<u>s</u> fasajes permite calcular el perfil de densidad local del plasma.

La elección de la frecuencia de la onda electromagnética usada como sonda vendrá determinada por el valor esperado de la densidad del plasma, ya que éste debe ser lo suficientemente transparente como para que no exista una r<u>e</u> fracción apreciable del haz. Dadas las secciones transversales de los plasmas producidos en los dispositivos de confinamiento magnético, y las densidades conseguidas, la longitud de onda del haz de prueba se encuentra en las bandas milimétricas y submilimétricas.

La medida de la densidad electrónica de un plasma se ha llevado a cabo utilizando métodos muy diferentes, habiendo sido objeto de gran número de publicaciones. No citaremos éstas aquí, sino que remitiremos a los trab<u>a</u> jos de recopilación existentes [1-3].

De todos los métodos posibles, la interferometría de microondas es la que se ha adoptado casi universalmente, ya que casi siempre es la solución que mejor se adapta al problema planteado, que es la medida de la variación temporal de la densidad del plasma. En su forma más sencilla un interferómetro de microondas está constituido por una fuente de microondas cuyo haz se desdo bla en dos haces. Una de ellos se emplea como señal de referencia, mientras -

que el otro atraviesa el plasma, sufriendo el desfasaje correspondiente. La composición de ambos da lugar a máximos y mínimos de interferencia, o "franjas", cuando al crecer rápidamente la densidad del plasma el ángulo de fase gira continuamente desde O a 2 $\pmb{\pi}$, presentándose franjas análogas al desaparecer el plasma. Aun cuando el número total de franjas está relaciona do con la densidad media máxima del plasma, no es fácil con este método seguir la evolución temporal de éste. Para resolver este problema se recurre a sistemas más elaborados. Uno de los más utilizados consiste en realizar una modulación de la fuente de microondas, lo que da lugar a un conjunto de ban das de interferencia desplazadas o "rayas de cebra" [4-10]. Estas bandas que son horizontales en ausencia de plasma, se deforman cuando aparece y evolucio na éste, pudiéndose obtener el valor del desfasaje a partir de dicha deformación y esto sin ninguna ambiguedad respecto al sentido de la variación. En otros sistemas basados en este principio, pero más perfeccionados, el valor del desfasaje se obtiene de forma directa y continua mediante un comparador di gital de fase [10-16].

En el dispositivo que aquí se describe se utilizan precisamente estos principios. Consta de un solo canal de medida, pudiéndose desplazar m<u>e</u> cánicamente todo el sistema a lo largo de la sección transversal del plasma. De esta forma, además de poderse determinar la variación temporal de la dens<u>i</u> dad a lo largo de una descarga, medidas sucesivas a lo largo de diferentes cuerdas permitirán determinar el perfil de densidad del plasma.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA INTERFEROMETRIA DE MICROONDAS.

2.1. Introducción.

Como ya se ha indicado, la medida de la densidad electrónica de un plasma puede abordarse por diferentes métodos, aunque los más extendidos son los interferométricos, basados en la determinación del desfasaje sufrido por una onda electromagnética al atravesar un plasma. A continuación se des criben las bases teóricas de la interferometría de microondas y se deducen las relaciones que permiten obtener la densidad media del plasma a lo largo de una cuerda y el perfil de densidad en una sección transversal a partir de la medida de los desfasajes.

2.2. Desfasaje introducido por un plasma en una onda electromagnética.

Cuando un campo electromagnético se propaga a través de un plasma de densidad electrónica N, éste se comporta como un medio dispersivo, con - una relación de dispersión para la onda ordinaria, $E11B_{o}$, dada por

$$\boldsymbol{\xi} = n^{2} = 1 - \frac{(\boldsymbol{\omega}_{p}/\boldsymbol{\omega})^{2}}{1 - \boldsymbol{i}(\boldsymbol{\omega})^{2}}$$
(1)

donde $\boldsymbol{\mathcal{V}}$ es la frecuencia de colisión electrónica, $\boldsymbol{\omega}_{p} = \frac{N_{e}^{2}}{\boldsymbol{\mathcal{E}}_{o} m_{e}}$ la frecuencia de la radiación electromagnética incidente, para la cual existe siempre asociada una densidad crítica, o de corte, dada por la relación

$$\boldsymbol{\omega}_{c}^{2} = \frac{N_{c} e^{2}}{m_{e} \boldsymbol{\xi}_{o}}$$
(2)

La parte imaginaria de (1) dará cuenta de la atenuación de la onda, mientras que su parte real contendrá la información sobre el camino óptico recorrido por la radiación.

з.

Para las condiciones experimentales existentes normalmente en los dispositivos de confinamiento magnético, tales como tokamaks, estellaratores y espejos, según las cuales la frecuencia de colisión electrónica es mucho - menor que la pulsación de la radiación incidente ($\mathcal{V} \ll \omega$), un diámetro del - plasma mucho menor que la longitud de onda λ_o en el vacio de la radiación incidente y una propagación de ésta perpendicular al campo magnético principal, esto es E $[]B_o$, la ecuación (1) se simplifica reduciéndose a

$$\boldsymbol{\xi} = n^2 = 1 - \left(\frac{\boldsymbol{\omega}_p}{\boldsymbol{\omega}}\right)^2 \tag{3}$$

que expresada en función de la densidad del plasma, N y de la densidad de corte, N, toma la forma

$$n^2 = 1 - \frac{N}{N_c}$$
(4)

que permitirá determinar N a partir de la densidad de corte N_{C} y del índice de refracción del plasma, n, que puede relacionarse con el desfasaje sufrido por la onda electromagnética al atravesar el plasma.

En efecto, sea k_0 el número de ondas de la radiación incidente en el vacio y k(s) el número de ondas de esta misma radiación después de haber recorrido un camino s dentro de un plasma de índice de refracción n. El desfasaje introducido por el plasma en la onda incidente vendrá dado por

$$\mathbf{\Delta \Phi}(\mathbf{s}, \mathbf{t}) = \int_{\mathbf{S}} \left[\mathbf{k}_{o} - \mathbf{k}(\mathbf{s}, \mathbf{t}) \right] \, d\mathbf{s} = \mathbf{k}_{o} \int_{\mathbf{S}} \left[1 - n(\mathbf{s}, \mathbf{t}) \right] \, d\mathbf{s}$$
(5)

Sustituyendo el valor de n(s,t) dado por (4), desarrollando en serie y suponiendo que $N/N_c \ll 1$ se obtiene

$$\Delta \dot{\Phi}(s,t) = \frac{k_0}{2N_c} \int_{s} N(s,t)ds \equiv \frac{\pi}{\lambda_0 N_c} \int_{s} N(s,t)ds \qquad (6)$$

Si se supone que los fenómenos de refracción son despreciables, la radiación recorrerá una cuerda de longitud S dentro del plasma, por lo que, si se define

$$\overline{N}_{s}(t) = \frac{1}{S} \int N(s,t) ds$$
(7)

como la densidad media a lo largo de la cuerda de longitud S, la ecuación (6) tomará la forma

$$\Delta \Phi_{\rm s}(t) = \frac{\pi \, {\rm s} \, \overline{\rm N}_{\rm s}}{\lambda_{\rm o} \, {\rm N}_{\rm c}} \tag{8}$$

expresión que permitirá determinar la densidad media de línea \overline{N}_{s} si se conoce el valor del desfasaje $\Delta \phi_{s}$.

En el caso de un perfil de densidad uniforme, es decir de una distribución de densidad rectangular, será $N_s = N_o$, donde N_o es la densidad en el centro del plasma, y por consiguiente

$$\Delta \bar{\phi}(t) = \frac{\pi N_{o}(t) S}{\lambda_{o} N_{c}}$$
(9)

En el supuesto de un perfil de densidad parabólico, es decir, dado

$$N(x) = N_0 (1 - (\frac{x}{a})^2)$$

donde a es el radio menor del plasma y N_0 la densidad en el centro de éste, se comprueba fácilmente que se verifica

$$\overline{N}(t) = \frac{2}{3} N_{o}(t)$$

donde $\overline{N}(t)$ es la densidad media a lo largo de un diámetro.

En virtud de la relación (8), la densidad media a lo largo de una cuerda vendrá dada, en función del desfasaje sufrido por la onda incidente por

$$\overline{N}_{s} = \frac{N_{c}\lambda_{o}}{\pi_{s}}\Delta\Phi$$
(10)

Sustituyendo valores, se tendrá pues

por

$$\overline{N}_{s} = 118,37 \quad \frac{f(Hz)}{S(cm)} \Delta \overline{\phi} (rad)$$
(11)

7

La densidad correspondiente a un desfasaje de 271 suele denominar se "valor de una franja". En el caso particular del interferómetro de micro ondas instalado en el tokamak TJ-1, de la División de Fusión Termonuclear de la JEN, para el cual f = 140 GHz, y en el supuesto de una medida a lo largo de un diámetro, S = 2a = 20 cm, se tendrá como valor de una franja

$$N = 5,21 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

supuesto una distribución uniforme de densidad. La densidad de corte sería en este caso

$$N_c = 2,43 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

En la figura 1 se ha representado el número de franjas en función de la densidad para dos perfiles de ésta.

2.3. Determinación del perfil de densidad de un plasma.

De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior la fórmula (10) permite determinar la densidad media del plasma a lo largo de una cuerda. En el caso de que se disponga de un sistema interferométrico multicanal, o se realice un barrido a lo largo de un diámetro supuesto que las descargas sean reproducibles, se podrá determinar el valor del desfasaje $\Delta \phi_s$ en función del radio y por tanto, el perfil de densidad media. En el supuesto de que d<u>i</u> cho perfil de densidad media sea simétrico, se puede transformar en un perfil de densidad local mediante una inversión de Abel.

En efecto, suponiendo que la densidad N(r) tiene simetría radial, el desfasaje $\Delta \phi(x)$ sufrido por una onda incidente a una distancia x del cen tro del plasma vendrá dado por

$$\Delta \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x}) = \frac{2\pi}{\lambda_{N_c}} \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{a}} \frac{N(\mathbf{r}) \mathbf{r} d\mathbf{r}}{\sqrt{r^2 - x^2}}$$
(12)

donde a es el radio menor del plasma.

Realizando una inversión de Abel de esta integral se podrá determinar el valor de la densidad, que vendrá dado por

$$N(\mathbf{r}) = -\frac{\lambda N_{c}}{\pi^{2}} \int_{\mathbf{r}}^{a} \underbrace{\Delta \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}) \mathbf{J}'_{dx}}_{\mathbf{r} \mathbf{v}^{2} - \mathbf{r}^{2}}$$
(13)

۰.

Esta relación muestra que la medida de N(r) es tanto más precisa cuanto mayor sea la precisión con que se conozca el valor de $\Delta \phi'(x)$, es de cir cuanto mayor sea el número de puntos de medida $\Delta \phi'(x)$. En Crenn [8] puede encontrarse un estudio de la influencia del número de canales sobre la precisión en la medida de N(r).

7.

El método de inversión de Abel solo puede aplicarse de forma rigurosa si la función de densidad tiene simetría radial. Para funciones de densidad no simétricas es preciso recurrir a métodos gráficos o numéricos, que son generalmente de mayor utilidad, pero en los cuales es preciso hacer a priori alguna hipótesis sobre la forma de la distribución de densidad local que se quiere evaluar. En la literatura científica pueden encontrarse ejemplos de los distintos métodos utilizados para resolver el problema [6,7, 17-23].



Fig. 1 Nº de franjas correspondientes a dos supuestos regimenes de densidad en el caso del Tokamak TJ-1

00

3. EL INTERFEROMETRO DE MICROONDAS.

3.1. Descripción general del sistema.

A continuación se describe el interferómetro de microondas existen te en la División de Fusión de la JEN, el cual fue suministrado por Tokamak Systems, conjuntamente con el TJ-1, como diagnóstico esencial para la medida de la densidad del plasma creado en dicho dispositivo. En la figura 2 se encuentra representado un esquema conceptual del sistema, en el que se han inclui do sus principales componentes.

En él puede verse como un generador de microondas (K) tipo klystron reflex (modelo Varian VRT 2121A), con una frecuencia f=140 GHz y una potencia de salidad de 135 mW es modulado en frecuencia mediante el generador de barri . do M (f = 1 MHz), inyectándose la señal de microondas a la entrada de un aco plador direccional (AD) de 20 db, que excita a su salida ondas en las ramas 1 y 2 del circuito de microondas. En la rama 1 la onda excitada se inyecta di rectamente a la entrada 1 del anillo híbrido AH, después de haber atravesado el atenuador A1. En la rama 2, la señal de microondas, después de atravesar el atenuador A2 y la línea de retardo L, atraviesa el plasma sufriendo un des fasaje que será función de la densidad de éste, inyectándose a continuación a la entrada 3 del anillo híbrido AH. Las señales procedentes de las ramas 2 y 4 del anillo híbrido pasan respectivamente por los detectores cuadráticos D1 y D2 y son inyectadas a la entrada de un circuito detector de cero y conformador (BAND-PASS), donde son sumadas, amplificadas y discretizadas. La señal procedente de este circuito pasa simultáneamente a los circuitos "Contador de franjas" (DUAL-PHASE) y "Comparador digital de fase" (PHASE), donde es anali zada, comparándola con la señal de sincronismo procedente del modulador de frecuencia, o reloj, M. Como resultado de este análisis se obtienen tres seña les, dos procedentes del circuito contador de franjas y una del circuito com parador digital de fase. De ellas, la denominada I, procedente del contador de franjas, suministra la evolución temporal de la densidad, representada me diante una serie de dientes de sierra, o franjas, cada uno de los cuales corresponde a un desfasaje en la señal de microondas igual a 271 radianes y cuya forma indica el sentido creciente o decreciente de la variación de la

-



Fig. 2, - Esquema del interferómetro de microondas

densidad. La señal Q, semejante a la anterior pero desfasada $\pi/2$ radianes en el tiempo, no añade nueva información, pero sirve, al compararla con la señal I,para descartar franjas espúreas. Por último, la señal denominada T, procedente del comparador digital de fase, suministra la variación temporal del desfasaje total sufrido por el haz de microondas al atravesar el plasma, es decir, el número total de franjas en función del tiempo y por tanto la v<u>a</u> riación temporal de la densidad del plasma.

A continuación se exponen con detalle los principios básicos que gobiernan el funcionamiento del interferómetro de microondas y se hace un análisis detallado de los circuitos electrónicos que forman la cadena de me dida, cuyos esquemas se encuentran representados en las figuras 14 a 19.

3.2. Principios básicos que determinan su funcionamiento.

Todo el funcionamiento del interferómetro se basa en la detección lineal del desfasaje sufrido por el haz de microondas al atravesar el plasma, utilizando para ello la modulación en frecuencia de dicho haz y las pro piedades mezcladoras de los anillos híbridos.

Considerando el esquema simplificado de la figura 3,M es un genera dor en diente de sierra (con una frecuencia nominal $f_m = 1$ MHz) que modula el klystron reflex K haciendo variar la tensión del reflector desde su tensión nominal de oscilación V_o hasta la V_o + V_m, donde V_m es la altura del diente de sierra.

De acuerdo con lo expuesto en el Apéndice I, esta variación de ten sión produce una variación en la frecuencia de oscilación del Klystron, de for ma que la dependencia temporal de la frecuencia de oscilación vendrá dada por

1

12.

la expresión

$$f(t) = f_{o} + \Delta f \frac{t}{T_{m}}$$
(14)



FIGURA 3. Esquema del interferómetro con su modulación de frecuencia.

donde f_o es la frecuencia nominal de oscilación del klystron, T_m el periodo de la señal moduladora y Δ f el valor máximo de la excursión de frecuencia, que vendrá determinado por la sensibilidad de modulación del reflector del klystron (en el tubo considerado ~3 MHz/V), y que estará limitado por la excursión máxima en tensión que se puede aplicar al reflector de forma que la modulación en amplitud sea mínima.

Designemos por $\boldsymbol{\varphi}_{o} = \boldsymbol{\omega}_{o}t + kx$ el ángulo de fase de la onda porta dora, donde $\boldsymbol{\omega}_{o}$ es la pulsación fundamental del generador de microondas en ausencia de modulación. En el caso de existir ésta, y teniendo en cuenta la desviación de frecuencia producida, dicho ángulo de fase vendrá representado por la expresión

$$\varphi_{o}(x,t) = 2\pi \int^{t} f(t) dt + k(t) \int_{x} dx$$

Como ya hemos indicado la señal procedente del generador se bifurca en el acoplador direccional propagándose por las dos ramas del interferómetro.

Designemos por

con

$$I_{1} = A_{1} e^{i \Psi_{1}(\mathbf{x}, t)}$$
(15)

$$\Psi_{1}(\mathbf{x},t) = 2\pi \int^{t} f(t) dt + k(t) \int_{X_{1}} dx \qquad (16)$$

la señal que después de viajar por la rama 1 del interferómetro incide en la entrada 1 del anillo híbrido AH. Sea S(t) el desfasaje introducido por el plasma en la señal que circula por la rama 2 del circuito. La señal correspondiente a la entrada 3 del anillo híbrido será

$$I_2 = A_2 e^{i \Psi_2(x,t)}$$
 (17)

con

$$\varphi_2(\mathbf{x},) = 2\pi \int^t \mathbf{f}(t) dt + \mathbf{k}(t) \int_{\mathbf{x}_2} d\mathbf{x} + \mathbf{\delta}(t)$$
(18)

Designemos por S_{12} y S_{14} las señales de salida en las ramas 2 y 4 del anillo híbrido procedentes de la señal incidente en el canal 1, y por S_{32} y S_{34} las correspondientes al canal de entrada 3. De acuerdo con las propiedades de los anillos híbridos, descritas en el Apendice II, dichas señales de salida ten drán la forma:

$$S_{12} = \frac{A_{1}}{\sqrt{2}} e^{i \Psi_{1}(x,t)}$$
(19)
$$S_{32} = \frac{A_{2}}{\sqrt{2}} e^{i \Psi_{2}(x,t)}$$

para el canal de salida 2, y

$$S_{14} = \frac{A_1}{\sqrt{2}} e^{i \{ \Psi_1(c,t) + \pi \}}$$

$$S_{34} = \frac{A_2}{\sqrt{2}} e^{i \Psi_2(c,t)}$$
(20)

para el canal de salida 4. A la salida de ambos canales ambas señales se sum<u>a</u> rán, dando lugar a dos ondas

$$S_{2} = B_{2} e^{i(\boldsymbol{\omega}_{0}t + \boldsymbol{\alpha}_{2})}$$

$$S_{4} = B_{4} e^{i(\boldsymbol{\omega}_{0}t + \boldsymbol{\alpha}_{4})}$$
(21)

donde $\omega_{_{
m O}}$ es la pulsación fundamental de la señal portadora de microondas, $lpha_2$

y \bigwedge_4 dos fases, que para lo que sigue son irrelevantes, y B_2 y B_4 las ampli tudes respectivas de las señales de salida que, de acuerdo con las reglas de composición vectorial, tienen los valores

$$B_2^2 = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} + A_1^A \cos(\varphi_2(x,t) - \varphi_1(x,t))$$
(22)

$$B_4^2 = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} + A_1^A \cos(\varphi_2(x,t) - \varphi_1(c,t) - \pi)$$
(23)

Ahora bien, teniendo en cuenta las relaciones (16) y (18)

$$\Psi_2(c,t) - \Psi_1(c,t) = k(t) (x_2 - x_1) + \delta(t)$$
 (24)

donde $x_2 - x_1 = L$ representará la diferencia de camino entre las dos ramas del interferómetro. Como por otra parte

$$k(t) = \frac{2\pi}{\lambda(t)} = \frac{2\pi}{c} f(t) = \frac{2\pi}{c} (f_{o} + \Delta f \frac{t}{T_{m}})$$
(25)

se tendrá finalmente

$$\Psi_{2}(\mathbf{x},t) - \Psi_{1}(\mathbf{x},t) = \frac{2\pi L f_{0}}{C} + \frac{2\pi L \Delta f}{C} \frac{t}{T_{m}} + \mathbf{S}(t)$$
(26)

El término $\frac{2\pi L f_0}{C}$ representa un desfasaje constante, que designare mos por φ_0 , mientras que el segundo es proporcional a la variación de frecuen cia ω_m introducida en la portadora por la modulación. Eligiendo L de forma que se verifique $\frac{L\Delta f}{C} = 1$ se tendrá finalmente

$$\Psi_2(\mathbf{x},t) - \Psi_1(\mathbf{x},t) = \omega_m t + \Psi_0 + \delta(t)$$
(27)

de modo que las ecuaciones (22) y (23) tomarán la forma

$$B_2^2 = \frac{A_1}{2} + \frac{A_2^2}{2} + A_1 A_2 \cos(\omega_m t + \psi_0 + \delta(t))$$
(28)

$$B_4^2 = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} - A_1 A_2 \cos(\omega_m t + \varphi_0 + \delta(t))$$
(29)

Se observa pues que las ondas de salida del anillo híbrido, represent<u>a</u> das por las ecuaciones (21), poseen amplitudes moduladas con una frecuencia igual a la de modulación de la fuente de microondas y, lo que es más importan te, incluyen la información contenida en S(t), es decir, contienen el desfas<u>a</u> je introducido por el plasma en la señal de microondas. Como los canales 2 y 4 de salida del anillo híbrido terminan en sen dos detectores cuadráticos, a la salida de estos se tendrán señales proporcionales a la potencia de las ondas de salida, es decir, proporcionales a B_2^2 y B_4^2 , señales que, de acuerdo con (28) y (29), tendrán caracter sinusoidal y contendrán la información sobre el desfasaje introducido por el plasma.

Prescindiendo de la componente continua común a ambas señales, ya que es fácil eliminarla electrónicamente, se tiene finalmente como señales proc<u>e</u> dentes de las dos ramas de salida del anillo híbrido

$$U_{1} \propto A_{1}A_{2} \cos(\boldsymbol{\omega}_{m}t + \boldsymbol{\varphi}_{0} + \boldsymbol{\delta}(t))$$
(30)

$$U_{2} \propto -A_{1}A_{2} \cos(\omega_{m}t + \varphi_{0} + \delta(t))$$
(31)

que representan dos oscilaciones sinusoidales en oposición de fase. Es impor tante asegurarse de que a la salida del anillo híbrido se tienen unas ondas de estas características, ya que puede ocurrir que al inyectarse por el canal 1 una potencia excesiva respecto al canal 2 el anillo híbrido deje de operar correctamente, no obteniéndose señales correctas. En la figura 4 (curvas (a) y (b)) puede verse un ejemplo de las señales obtenidas a la salida de los d<u>e</u> tectores cuadráticos D_1 y D_2 .

El problema de la determinación de la densidad queda reducido pues a extraer de las señales (30) y (31) la información en ellas contenida sobre el desfasaje sufrido por el haz de microondas al atravesar el plasma. Esto se realiza mediante los circuitos conformador, contador de franjas y comparador digital de fase, cuyo funcionamiento se describe a continuación.

3.3. Procesamiento de las señales y determinación del desfasaje.

Como ya se ha indicado anteriormente, un desfasaje igual a 2π radianes de la señal de microondas suele denominarse valor de una "franja". En lo que si gue se describe el tratamiento dado a la señal procedente de los detectores cua dráticos para obtener el desfasaje y determinar el número total de franjas y su

1

dependencia temporal. Esto tiene lugar mediante los circuitos "detector de cero y conformador de impulsos" (BAND-PASS), "contador de franjas (DUAL- -PHASE)y comparador digital de fase (PHASE), cuyos esquemas se encuentran r<u>e</u> presentados en las figuras 14 a 16.

3.3.1 Circuito detector de cero y conformador.

El circuito conformador está constituido esencialmente por un ampl<u>i</u> ficador diferencial (MC1733) y un comparador de tensión (MC 1710) trabajando en saturación.

Las señales $U_1 y U_2$ procedentes de los detectores D1 y D2 atacan al amplificador diferencial a través de un montaje simétrico restándose, es decir, U_2 es cambiada de signo y sumada a U_1 amplificándose a continuación, de forma que a la salida del amplificador se tendrá una señal

$$U = g(A_1 A_2) \cos \left(\omega_m t + \psi_0 + \delta(t)\right)$$
(32)

en la cual $g(A_1A_2)$ será proporcional a la ganancia y a las amplitudes de las señales de entrada. La señal procedente del amplificador diferencial at<u>a</u> ca al comparador de tensión, que trabajando en saturación, suministra una s<u>e</u> ñal positiva constante siempre que la tensión de U respecto a masa sea positiva y una señal negativa constante siempre que U sea negativa, tal como se observa en la figura 4 donde la curva (c) representa la señal suma a la sal<u>i</u> da del amplificador diferencial y la curva (d) la señal entregada por el com parador de tensión. De esta forma, mediante la discretización de la señal U, la información sobre el desfasaje contenida en la señal inicial queda trasl<u>a</u> dada al desplazamiento existente entre el borde positivo de esta señal discr<u>e</u> tizada y la onda cuadrada obtenida de la señal procedente del generador de barrido en diente de sierra utilizado para modular el generador de microondas. Esta señal discretizada, y que contiene la información sobre el desfasaje introducido por el plasma, es la que se introduce en los circuitos contador de

1

franjas y comparador digital de fase para su comparación con la señal procedente del modulador. Además de la señal indicada un inversor suministra una señal de polaridad inversa a la anterior



FIGURA 4. Formas de onda en distintos puntos del circuito de conformación

- (a) Señal a la salida del detector D1 y entrada del circuito
- (b) Señal a la salida del detector D2 y entrada del circuito
- (c) Señal suma a la salida del amplificador diferencial
- (d) Señal entregada por el comparador de tensión.

3.3.2. Circuito contador de franjas.

Este circuito, que suministra la variación de la densidad en función del tiempo en forma de una señal constituida por una serie de dientes de si<u>e</u> rra, cada uno de los cuales corresponde a una franja o desfasaje igual a 2π radianes, y que se encuentra representado en la figura 15, está constituido por dos cadenas idénticas, cada una de ellas formada por un multivibrador monoes

7

table (SN74123), una puerta NAND (7400), un filtro pasa bajo y un amplifica dor diferencial. Dado que el comportamiento de ambas cadenas es idéntico, se analizará únicamente el comportamiento de una de ellas.

Una de las entradas del monoestable es atacada por la onda cuadrada patrón procedente del modulador de frecuencia, que actúa también como r<u>e</u> loj, de forma que este monoestable permanecerá en estado 1 hasta que le llegue el frente de subida de la onda cuadrada, en cuyo momento pasará al estado 0 produciéndose un impulso, es decir, los impulsos producidos por el monoest<u>a</u> ble marcarán los ceros correspondientes a un desfasaje igual a 2π .

La otra entrada del multivibrador es atacada por la señal procedente del conformador y pasará gradualmente de un estado 1 a un estado 0 siempre que le llegue un flanco de subida.

De acuerdo con lo expuesto se tendrá a la salida del multivibrador dos trenes de impulsos, correspondientes a las dos ondas cuadradas introduci das a su entrada, tal como se muestra en la figura 5, curvas (a) a (d) cuyo desplazamiento entre picos representa, en cada instante, el valor del desfasa je φ_{o} + δ (t) de la señal de microondas.



FIGURA 5. Señales a la entrada y salida del multivibrador monoestable

- (a) Señal procedente del reloj
- (b) Señal de salida correspondiente a la señal procedente del reloj

-

- (c) Señal procedente del conformador
- (d) Señal de salida correspondiente a la señal (c)

Los impulsos procedentes del multivibrador atacan las entradas A y B de unas puertas NAND, conectadas tal como se indica en la Figura 6.



FIGURA 6. Puerta NAND

Por la entrada A se introducen los impulsos correspondientes al reloj y por la B los impulsos correspondientes a la señal de microondas,y que son los que contienen la información sobre el desfasaje. De acuerdo con la tabla de verdad de este dispositivo, representado en la Figura 7, se ob

A	В	S
0	1	0
1	1	1 0
0	0	1
1	0	1

FIGURA 7. Tabla de verdad correspondiente a la puerta NAND.

serva que para el estado de entrada (1,1) son posibles dos estados de sali da estables y que, por consiguiente, la situación de este estado vendrá de terminada por la situación inmediatamente anterior.

En la Figura 8, curvas (a)-(c), se encuentran represen tados los impulsos a la entrada y salida de la puerta NAND. En ella se obser va como a la salida de la puerta NAND se produce un impulso cuadrado cuya an

7

chura viene determinada por la separación temporal entre los impulsos proc<u>e</u> dentes del reloj y los del circuito conformador, de forma que el desfasaje introducido por el plasma ha quedado trasladado a la anchura de unos impu<u>l</u> sos.



FIGURA 8. Impulsos a la entrada y salida de la puerta NAND.

- (a) Impulso de entrada correspondiente a la señal de microondas.
 - (b) Impulso de entrada correspondiente al reloj
 - (c) Impulso de salida de la puerta NAND.

Por consiguiente, a la salida de la puerta NAND se tendrá un tren de impulsos cuadrados cuya anchura será función del desfasaje existente en tre la señal procedente del reloj y la señal correspondiente al canal de me dida del circuito de microondas y cuyas anchuras crecientes o decrecientes marcarán el sentido de variación de la densidad. La coincidencia de los im pulsos correspondientes a ambos canales indicará un desfasaje igual a 2π radianes.

La señal de salida de la puerta NAND es procesada por el filtro pa sabajo constituido por el condensador C y la resistencia R del esquema de la Figura 15, de donde pasa a un amplificador diferencial, que constituye

la etapa de salida del circuito contador de franjas.

Como consecuencia del tratamiento sufrido por la señal en estos el<u>e</u> mentos se tiene a la salida una señal en forma de diente de sierra, cada uno de los cuales corresponde a un desfasaje de 2 π radianes, es decir, constituye una franja, y cuya forma, creciente o decreciente, indicará el sentido de variación de la densidad.



FIGURA 9. Señales de salida del interferómetro de microondas.

- (a) Señal correspondiente a la salida I del circuito contador de franjas.
- (b) Señal correspondiente a la salida Q del circuito contador de franjas
- (c) Corriente de plasma I_p
- (d) Señal de salida del comparador digital de fase (desfasaje total)

En la figura 9 se encuentran representadas las señales suministradas por el circuito contador de franjas, tanto para la salida I como la Q, junto

con la señal correspondiente al desfasaje total, suministrada por el compa rador digital de fase y la variación de la corriente del plasma. En ella puede observarse la forma en diente de sierra de las señales entregadas por el circuito contador de franjas, así como el desfasaje igual a $\pi/2$ existen te entre las señales I y Q que puede ser utilizado para rechazar señales es púreas. La forma creciente o decreciente de los dientes de sierra se corres ponde con el sentido de variación de la densidad, representado por la señal correspondiente al desfasaje total.

3.3.3. Comparador digital de fase

Este circuito suministra una señal cuya amplitud es, en cada instan te, proporcional al desfasaje total sufrido por la señal de microondas al atravesar el plasma, es decir, da directamente la variación en función del tiempo de la densidad de línea correspondiente a la cuerda a través de la cual se mide.

Su principio de funcionamiento es análogo al propuesto por Meddens y Taylor [12], encontrándose representado su esquema bloque en la Figura 10, y el esquema electrónico detallado en la Figura 16.

En esencia el circuito está constituido por dos contadores binarios, uno de ellos contando hacia adelante y el otro contando hacia atrás, cuyas salidas se introducen en un sumador completo de 8 bits, de los cuales se utilizan solo 6, constituido por dos unidades SN7483, de cuatro bits cada una colocadas en serie. La salida del sumador binario se introduce en un conve<u>r</u> tidor digital analógico de 6 bits, cuya salida analógica se envia a un ampl<u>i</u> ficador operacional que suministra a su salida una señal proporcional al de<u>s</u> fasaje total introducido por el plasma.

La señal cuadrada procedente del conformador y que contiene la infor

-



Fig. 10 Diagrama bloque del comparador digital de fase

mación sobre el desfasaje se introduce en el contador hacia atrás, constitui do por la pareja de contadores binarios reversibles SN74193 montados en serie, mientras que la señal de referencia procedente del reloj, o modulador, es introducida en el contador hacia adelante, idéntico al anterior, de forma que al introducirse las salidas de estos en el sumador digital se obtiene a la salida de éste una señal digital que es en cada instante proporcional al desfasaje entre ambas señales, tal como se indica en la representación esqu<u>e</u> mática de la Figura 11.

La salida del sumador digital se introduce en el convertidor digital analógico, de forma que, después de filtrada e integrada, se tiene una señal analógica que representará el desfasaje total sufrido por el plasma y por con siguiente la densidad de línea como función del tiempo.

Con el fin de poder representar valores del desfasaje inferiores a 2 π , se introducen las señales procedentes del conformador además de a los numeradores, al dígito menos significativo del sumador digital, corriendose un bit las salidas de los contadores y haciendo que de esta forma el sumador sea sensible de forma lineal y continua al desfasaje del plasma.

La inicialización de los contadores antes de comenzar la medida se realiza mediante un circuito de puesta a cero (RESET), Figura 17, cuyo com ponente principal es un multivibrador monoestable que manda una señal de borrado que coloca a los contadores en valores prefijados cada vez que rec<u>i</u> be una señal del sistema de disparo y control del tokamak.

En virtud de la señal de borrado las dos etapas del contador hacia atrás se colocan en estado 15 mientras que en el contador hacia adelante la primera etapa se coloca en estado 10 y la segunda en estado 15. La razón de haber elegido estos valores para la inicialización de los contadores es per mitir un cierto retraso, que en este caso es de 4 MS, entre el instante en que se produce el disparo y aquel en el que el contador correspondiente al reloj pasa por el valor cero, que se tomará como referencia para la medida de la densidad del plasma.

Como ya se ha indicado, en la figura 11 se tiene una representación



Fig. 11 Representación esquemática de la entrada y de la salida del comparador digital de fase.

- (a) Impulsos de referencia.(b) Impulsos de paso de cero desplazados por el plasma.
- (c) Salida no integrada del convertidor digital-analógico

esquemática de las señales de entrada y salida del comparador digital de f<u>a</u> se y en la figura 12 se muestra un ejemplo de las señales obtenidas en las salidas I, Q y T del interferómetro de microondas correspondientes a una de<u>s</u> carga tipo tokamak, en la que ha tenido lugar inyección adicional de gas durante la descarga.



FIGURA 12. Señales en las salidas I, Q y T del interferómetro de microondas en el caso de una descarga tipo tokamak

- (a) Señal correspondiente a la salida I del circuito contador de franjas.
- (b) Señal correspondiente a la salida Q del mismo circuito
- (c) Señal correspondiente a la salida T del comparador digital de fase
- (d) Corriente de plasma, I_p

Barrido horizontal: 4 ms/división

3.3.4. Reloj y modulador.

El papel de este circuito (AW SWEEP) es suministrar las señales de control del sistema. En particular suministra las señales de referencia para los circuitos contador de franjas y comparador digital de fase, además de pro ducir la señal en diente de sierra que modula la tensión del reflector del klystron reflex. Está constituido por un reloj (74LS124) cuya señal se intro duce a un contador binario de 4 bits (7493) funcionando como contador serie de 3 bits y que actua como divisor por 2, el cual suministra la señal de ref<u>e</u> rencia para los circuitos contador de franjas y comparador digital de fase y dispara el multivibrador monoestable (74121) que dará lugar a la modulación del klystron. En la Figura 18 se encuentra un esquema detallado de este circu<u>i</u> to.

3.4. Dispositivo experimental.

Como ya se ha indicado anteriormente la fuente de microondas es un klystron reflex modelo VARIAN VRT2121A, con una frecuencia nominal de 140 GHz y una potencia de salida de 135 mW. La sintonia del sistema se realiza visu<u>a</u> lizando la señal en un osciloscopio.

Después de bifurcada por el acoplador direccional, la señal correspon diente a la rama 2 del interferómetro se inyecta en una guia de onda rectangular sobredimensionada correspondiente a la banda X que actua de línea de r<u>e</u> tardo. Al final de su recorrido se reduce a sus dimensiones con el fin de t<u>e</u> ner una mejor focalización al inyectarla en el plasma.

La optica de inyección y recogida de la señal de microondas está cons tituida por un par de espejos esféricos de aluminio de 10 cm de distancia focal, que se pueden desplazar según dos ejes perpendiculares entre si y gra <u>a</u> ble verticalmente (ver Figura 13) lo que permite un buen enfoque del haz de -

microondas y su posterior recogida.

Todo el sistema de microondas y la electrónica asociada se encuentra instalado en un armario metálico montado sobre un carro que se puede desplazar sobre unos railes mediante un motor electrico reversible. La posición del carro queda registrada mediante un numerador electrónico de 4½ dígitos, pudié<u>n</u> dose reproducir la posición del carro con una precisión de 0,5 cm, suficiente para las necesidades de las medidas. Este movimiento de traslación del carro permite realizar medidas de la densidad del plasma a lo largo del diámetro m<u>e</u> nor del toro.

Las señales analógicas procedentes de las salidas I, Q y T del interf<u>e</u> rómetro de microondas son recogidas en sendas pistas de un tambor magnético, de donde pueden recuperarse para su visualización en la pantalla de un tubo de rayos catódicos o bien digitalizarse para su almacenamiento en el ordenador PDP 11/34, utilizando como sistema de adquisición y almacenamiento de datos del TJ-1.

Los autores dan las gracias a José Ramón Cepero Diaz por sus coment<u>a</u>rios en relación con este trabajo.



Fig. 13 Optica de inyección del interferómetro de microondas

3



Fig. 14 Circuito detector de cero y conformador ("BAND - PASS")

ЗО



Fig. 15. - Circuito contador de franjas ("DUAL PHASE")

β



Fig. 16 Circuito comparador digital de fase (PHASE)

32

Al comparador digital de fase

18



Fig. 17 Circuito de borrado y puesta a cero (RESET)



NATION CONTRACTOR CONTRACTOR

a¹

اري. ارون

Fig. 18 Circuito modulador de frecuencia y reloj

34



Fig. 19. - Preamplificador

:

REFERENCIAS.

- 1. M.A. HEALD y C.B. WHARTON, "Plasma Diagnostics with Microwaves" John Wiley and Sons Inc, New York, 1965
- H. HERMANSDORFER, Microwave Diagnostic Techniques, en "Plasma Diagnostics" Editor W. Loche-Holtgreven North-Holland Publishing Co., Amsterdam, p 527 1968.
- 3. W.P. ERNST, "A Survey of Microwave Electron Density Measuring Systems used in Controlled Fusion Research" IEEE Trans. Nuclear Science, vol. NS-19, p. 740, 1972.
- 4. G. LISITANO "A Microwave Dual Interferometer for Plasma Diagnostics" Comptes Rendus de la VI^e Conference Internationale sur les Phénomènes d'Ionisation dans les Gaz, París, Vol. 4, pp. 199-201 (1963).
- 5. G. LISITANO, "Automatic Phase-Measuring System for a 8 mm Carrier Wave and its 4 mm Harmonic" Rev. Sci. Instr. <u>36</u>, 364 (1965).
- 6. G. LISITANO, N. GOTTARDI, B. CANNICI y otros. "Determinazione del profilo di densità de un plasma di tipo "Tokamak" mediante interferometría multic<u>a</u> nale ad onde millimetriche". Alta Frequenza, No. 8, Vol. XLIII, pp 560-564 (1974).
- 7. G. LISITANO, P. MORANDI, B. CANNICI, E. ROSSETTI y N. GOTARDI "Density Distribution Measurements in Large C.T.R. Devices" IPP III/17, Mayo 1975, Garching (R.F. Alemania).
- 8. J.P. CRENN. "Etude de la Mesure de Densité Electronique du Plasma du Tokamak-FAR par Interférometrie Microonde". EUR-CEA-FC-608, Agosto 1971, Fontenay-aux-Roses(Francia).
- 9. J.P. CRENN, "Mesure du profil de densité électronique dans un plasma inhomogene (Comunicación privada)

36.

-

- 10. V.P. BHATNAGAR, M. DURVAUX, A.M. MESSIAEN, G. BOSIA y R.R. WEYNANTS "Density Distribution Measurements in Erasmus Tokamak by a Spatially Scanned Single Channel 4mm Wave Interferometer System" Laboratory Report No. 63, Diciembre 1976. Laboratoire de Physique des Plasmas Bruselas.
- 11. C.A.J. HUGENHOLTZ y A.J. PUTTER. Microwave Interferometer with Digital Read-out for Large Numbers of Fringes. Rijnhuizen Report 73, 81, September 1973, FOM-Jutphaas, Holanda.
- 12. B.J.H. MEDDENS y R.J. TAYLOR, "A Multiradian mm-Interferometer using a Digital Phase Comparator" Rijnhuizen Report 74-85, October 1974, FOM-Iutphaas, Holanda.
- 13. K. MATSUURA, J. FUJITA, A. OGATA y K. HABA, "Direct-Reading Type Microwave Interferometer" IPPJ-T-29, October 1977, Nagoya, Japón
- 14. M. DURVAUX, "Realisation d'un interferometre multicanal en 2mm: Application à la mesure de la distribution de densité électronique d'un plasma de stell<u>a</u> rator. EUR-CEA-FC-1009, Junio 1979, Fontenay-aux-Roses, Francia
- 15. J.B. LISTER, R.W. MEANS y P. OBERSON, "Microprocessor-Controlled Phase Analysis for 2 mm Microwave Interferometer on the TCA Tokamak," LRP 171/80, Diciembre 1980, Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Lausanna, Suiza.
- 16. P.W. HUTTEMANN y G. WAIDMANN, "A Real Time 155 GHz Millimeter Wave Interferometer Module for Electron Density Measurement in Large Plasma Devices" Jül-1802, Septiembre 1982, Institut für Plasmaphysik, Jülich, Alemania.
- 17. K. BOCKASTEN, "Transformation of Observed Radiances into Radial Distribution of the Emission of a Plasma. Journal Optical Society of America, 51, 943 (1961).

1

- 18. W.L. BARR, "Method for Computing the Radial Distribution of Emitters in a Cylindrical Source. Journal Optical Society of America, 52, 885 (1962).
- 19. J.M. MERMET y J.P. ROBIN, "Etude de l'inversion d'Abel en vue de la mesure de la répartition de la temperature dans un plasma inductive" Rev. int. Htes. Temp. et Refract. <u>10</u>, 133 (1973).
- 20. C. FLEURIER y J. CHAPELLE, "Inversion of Abel's Integral Equation.-Application to Plasma Spectrometry.Computer Phys. Communications <u>7</u>, 200 (1974)
- 21. S. CORTI, "The Problem of Abel Inversion in the Determination of Plasma Density from Phase Measurements Lettere Nuovo Cimento <u>29</u>, 25 (1980)
- 22. A. KUTHY, "An Interferometer and an Abel Inversion Procedure for the Measurement of the Electron Density Profile in a Cold Gas-Blanket Experiment" Nucl. Instr. Methods 180, 7 (1981)
- 23. A.P. NAVARRO, V.K. PARE, J.L. DUNLAP "LERFCM.- A Computer Code for Spatial Reconstruction of Volumen Emission from Chord Measurement in Plasmas" Informe ORNL/TM-7499, January 1981, Oak Ridge (EE.UU).

-

APENDICE I

El klystron reflex

El klystron reflex es un tubo oscilador con modulación de velocidad, de relativamente baja potencia, que se usa como oscilador local en los receptores y fuentes emisoras de microondas. Cubren un margen de frecuencias de 500 MHz a 300 GHz, con potencias de salida de unos pocos milivatios hasta aproximadamente 0,5 W, existiendo también algunos modelos cuya poten cia de salida puede alcanzar los 10 W.

En la figura I-la se indica el esquema conceptual de un klystron reflex, representándose en la figura I-lb la distribución de potenciales en su interior. El principio de funcionamiento de un klystron reflex es el siguiente:



Figura I-1

El haz de electrones producido en el cátodo, convenientemente enf<u>o</u> cado y acelerado por el potencial V_o, es dirigido hacia la cavidad de tipo reentrante definida por las rejillas, atravesándola y acercándose al electr<u>o</u> do reflector que se encuentra a un potencial negativo $-V_r$ respecto al catódo. El campo retardado existente entre la rejilla y el reflector frena a los ele<u>c</u> trones obligándoles a retornar hacia la cavidad.

Supongamos que el tubo oscila, es decir, existe una señal de r.f. aplicada a la cavidad. Los electrones que la atraviesan sufrirán una modul<u>a</u> ción de velocidad, que en el espacio correspondiente al reflector se conve<u>r</u> tirá en una corriente alterna, en virtud del agrupamiento sufrido por los ele<u>c</u> trones al alcanzar los más rápidos a los más lentos. El tiempo transcurrido entre el primer paso por la cavidad y su retorno a ésta de un grupo particular de electrones es función de la magnitud del campo retardador, el cual pu<u>e</u> de escogerse de forma que el retorno a la cavidad de dicho grupo de electrones coincida con el instante en el que el campo de radiofrecuencia es máximo. Por consiguiente dicho grupo de electrones cederá energía al campo y mante<u>n</u> drá la oscilación a la frecuencia propia de la cavidad.

La condición para que esta transferencia de energía sea máxima es que el tiempo de tránsito de los electrones en el campo retardador sea igual a -(n + 3/4) ciclos., siendo n un número entero positivo o cero.

El proceso de agrupamiento y la condición para potencia de salida máxima puede comprenderse fácilmente con ayuda del diagrama de la figura I-2.

Cada electrón sale de la cavidad con diferente velocidad dependien do del instante que pasó por ella y del campo existente, y recorrerá una di<u>s</u> tancia antes de ser reflejado que dependerá de que haya sido acelerado (ele<u>c</u> trón B), retardado (C) o que no hay sufrido alteración alguna (A). Esta modulación en velocidad producirá un empaquetamiento alrededor del electrón A, que atravesó la cavidad cuando el campo oscilante era nulo. Para que haya c<u>e</u> sión de energía el paquete de electrones tiene que volver a la cavidad en el instante en que el voltaje retardador es máximo, es decir, en el instante t₂. De *e*-uerdo con la figura, se ve que entre el instante de partida $\frac{1}{1}$ y el de llegada t₂ tiene que haber transcurrido un tiempo de tránsito igual a (n + 3/4)



Figura I-2.- Diagrama espacio-tiempo del movimiento de los electrones en el espacio reflector de un klystron reflex.

ciclos, donde n es un entero positivo o cero. Se ve pues que para un potencial acelerador dado, hay distintos valores del potencial reflector que darán lugar a oscilaciones, correspondiendo cada uno a un valor diferente de n. Estos reciben el nombre de modos. Al hacerse más negativa la tensión del reflector con respecto al cátodo, el número <u>n</u> que define el modo disminuye, y como los ele<u>c</u> trones retornan a mayor velocidad al aumentar la tensión del reflector, la potencia de salida del klystron aumenta al aumentar la tensión de áquel. Sin e<u>m</u> bargo, hay una tensión límite del reflector para la cual el tiempo de tránsito se hace tan corto que no es posible un buen empaquetamiento de los electrones. Por consiguiente dado un tubo y una tensión de aceleración, existe un cierto modo para la tensión de reflector que da la máxima potencia de salida.

1

41.

La oscilación del klystron tiene lugar no solo para valores discre tos de la tensión del reflector, correspondientes a un valor entero exacto de <u>n</u>, sino también cuando la tensión del reflector varia ligeramente a un la do y otro de dicho valor exacto permitiendo una de las posibilidades más int<u>e</u> resantes del klystron reflex que es la de su sintonización electrónica.

En la figura 3 se han representado los modos de oscilación de un klystron reflex en función de la tensión del reflector. En ella se ve que al variar la tensión del reflector ligeramente a un lado u otro de su valor óptimo, correspondiente a un determinado modo, es posible variar también la frecuencia de oscilación. Sin embargo, al retornar los electrones antes o después del tiempo óptimo, los paquetes de electrones no estarán tan bien formados y se entregará menos energía al campo de radiofrecuencia, es decir, se tendrá menos potencia de salida.



Tensión del reflector (V)

1

Figura I-3.- Modos de oscilación de un klystron reflex

Como no siempre el modo que da mayor potencia de salida es el que permite un mayor margen de sintonia, la elección del modo de operación será un compromiso entre la potencia de salida necesaria y el margen de sintoniza ción necesario. A veces esta sintonización electrónica no es suficiente para cubrir todo el margen de sintonia necesario, especialmente cuando el tubo ac tua como receptor, por lo que en general llevan incorporado una sintonización mecánica que permite variar la frecuencia de oscilación alterando las dimensiones o forma de la cavidad del oscilador.

El hecho de que la frecuencia de oscilación sea función de la tensión del reflector puede utilizarse para modular en frecuencia el klystron reflex, aplicando una señal moduladora al electrodo reflector, supuesto éste ajustado para su potencia máxima. La variación de frecuencia dependerá de la amplitud de la señal de modulación. Con el finde reducir la modulación en amplitud será necesario limitar la excursión de la señal moduladora a un intervalo pequeño y trabajar en los modos superiores.

APENDICE II

El Anillo Híbrido.

Es un acoplador direccional terminado, con un coeficiente de acopl<u>a</u> miento igual a ½. Su estructura se encuentra representada en la figura II-1. Como puede verse está constituido por cuatro brazos coplanarios, situados en un plano E, de forma que los tres primeros están separados respecto al siguien te una distancia igual a $\lambda g/4$, mientras que la separación entre el primer brazo y el cuarto es igual a $3\lambda g/4$

La terminación de los brazos y, por tanto, la no existencia de ondas reflejadas se consigue haciendo que la admitancia de la línea circular sea igual a $\sqrt{2}$ veces la admitancia de los brazos. Constituyen un caso particular de las T mágicas y al igual que en éstas una señal de potencia que entre por el brazo 1 se divide por igual entre los brazos 2 y 4, reforzándose las ondas que viajan a lo largo del anillo en direcciones opuestas. Por el contrario las ondas que alcanzar el brazo 3 se cancelan y no dan ninguna señal a su salida.



Figura II - 1

En efecto, supongamos que por el canal 1 entra una onda electromagné tica, representada por la expresión

$$I_{1} = A e^{i(wt + kx)}$$
(II-1)

Esta onda divide su potencia en partes iguales entre dos ondas. Una que cir cula en el sentido $1 \rightarrow 2$ y otra en el $1 \rightarrow 4$. La primera, al llegar a cada uno de los brazos siguientes tendrá, respectivamente, una fase:

en el brazo 2
en el brazo 3
en el brazo 4

$$\varphi_2 = wt + kx + \frac{\pi}{2}$$

 $\varphi_3 = wt + kx + \pi$
 $\psi_4 = wt + kx + \frac{3\pi}{2}$
(II-2)

Análogamente, la onda que circula en la dirección 1 - 4 tendrá las fases siguientes:

en el brazo 4	$\varphi_4 = wt + kx + \frac{3\pi}{2}$	
en el brazo 3	$\varphi_3 = wt + kx + 2\pi$	(II-3)
en el brazo 2	$\varphi_2 = wt + kx + \frac{5\pi}{2}$	

Al componer las ondas incidentes en cada uno de los canales de salida se tendrá respectivamente:

Para el canal 2

$$S_{2} = \left\{ \frac{A^{2}}{8} + \frac{A^{2}}{8} + 2 \frac{A^{2}}{8} \cos\left(\frac{5\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} e^{i(wt + kx + \frac{\pi}{2})} = \frac{A}{\sqrt{2}} e^{i(wt + kx + \frac{\pi}{2})}$$
(II-4)

Para el canal 3

$$S_{3} = \left\{ \frac{A^{2}}{8} + \frac{A^{2}}{8} + 2\frac{A^{2}}{8} \cos (2\pi - \pi) \right\}^{\frac{1}{2}} e^{i(wt + kx)} = 0 \quad (II-5)$$

-

Para el canal 4

$$S_{4} = \left\{ \frac{A^{2}}{8} + \frac{A^{2}}{8} + 2 \frac{A^{2}}{8} \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \frac{3\pi}{2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} e^{i} (wt + kx + \frac{3\pi}{2}) =$$

$$= \frac{A}{\sqrt{2}} e^{i(wt + kx + \frac{3\pi}{2})}$$
(II-6)

Se comprueba, pues, como ya se había indicado, que al llegar al canal 3 dos ondas de igual amplitud y fases opuestas interfieren destructivamente, cancelándose. Por consiguiente, no existe en este canal onda de salida proc<u>e</u> dente de una onda incidente en el canal 1.

Multiplicando por -i la parte oscilante para extraer la información física contenida en la onda se tiene

$$S_{2} = \frac{A}{\sqrt{2}} \operatorname{sen} (wt + kx)$$

$$S_{4} = -\frac{A}{\sqrt{2}} \operatorname{sen} (wt + kx)$$
(II-7)

Se observa, pues que la onda incidente en el canal 1 excita en los canales 2 y 4 ondas de potencia mitad, estando la primera en fase y la segun da en contrafase respecto a la onda incidente.

Haciendo un análisis semejante para una onda que incida en el canal 3 se encuentra que el canal 1 lo verá en cortocircuito, y no excitará onda de salida en él, mientras que en los canales 2 y 4 se excitarán ondas de potencia mitad a la incidente y en concordancia de fase con ésta.

Esta propiedad hace que el anillo híbrido se utilice como mezclador equilibrado de las señales incidentes en las vias 1 y 3, obteniéndose, en las salidas 2 y 4 la suma y diferencia de éstas, respectivamente.

J.E.N. 565

Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid.

"Plasma density determination by microwave interferometry".- The 2 mm interferometer of the TJ-1 Tokamak.

MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs.

In this paper a description is given of the microwave interferometer used for measuring the plasma electronic density in the TJ-1 Tokamak of Fusion Division of JEN.

The principles of the electronic density measurement are discussed in detail, as well as those concerning the determination of density profiles from experimental data. A description of the interferometer used in the TJ-1 Tokamak is given, together with a detailed analysis of the circuits which constitute the measuring chain. The working principles of the klystron reflex and hybrid rings are also presented.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation.

J.E.N. 565

Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid.

"Plasma density determination by microwave interferometry".- The 2 mm interferometer of the TJ-1 Tokamak.

MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs.

In this paper a description is given of the microwave interferometer used for measuring the plasma electronic density in the TJ-1 Tokamak of Fusion Division of JEN.

The principles of the electronic density measurement are discussed in detail, as well as those concerning the determination of density profiles from experimental data. A description of the interferometer used in the TJ-1 Tokamak is given, together with a detailed analysis of the circuits which constitute the measuring chain. The working principles of the klystron reflex and hybrid rings are also presented.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation.

J.E.N. 565 \

Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid.

"Plasma density determination by microwave interferometry".- The 2 mm interferometer of the TJ-1 Tokamak.

MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs.

In this paper a description is given of the microwave interferometer used for measuring the plasma electronic density in the TJ-1 Tokamak of Fusion Division of JEN.

The principles of the electronic density measurement are discussed in detail, as well as those concerning the determination of density profiles from experimental data. A description of the interferometer used in the TJ-1 Tokamak is given, together with a detailed analysis of the circuits which constitute the measuring chain. The working principles of the klystron reflex and hybrid rings are also presented.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: A14. Plasma Density. Plasma Diagnostic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation.

J.E.N. 565

Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid.

"Plasma density determination by microwave interferometry".- The 2 mm interferometer of the TJ-1 Tokamak.

MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs, 29 Fefs.

In this paper a description is given of the microwave interferometer used for measuring the plasma electronic density in the TJ-1 Tokamak of Fusion Division of JEN.

The principles of the electronic density measurement are discussed in detail, as well as those concerning the determination of density pro files from experimental data. A description of the interferometer used in the TJ-1 Tokamak is given, together with a detailed analysis of the circuits which constitute the measuring chain. The working principles of the klystron reflex and hybrid rings are also presented.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation.

J.E.N. 565 J.E.N. 565 Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid. Junta de Energía Nuclear. División de Fusión. Madrid. "Determinación de la densidad de un plasma por "Determinación de la densidad de un plasma por interferometría de microondas" - El interferómetro interferometría de microondas" - El interferómetro de 2 mm del Tokamak TJ-1. de 2 mm del Tokamak TJ-1. MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs. En este trabajo se describe el interferómetro de microondas utiliza-MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs. En este trabajo se describe el interferómetro de microondas utilizado en el Tokamak TJ-1, de la División de Fusión Termonuclear de la JEN, do en el Tokamak TJ-1, de la División de Fusión Termonuclear de la JEN, para la medida de la densidad electrónica del plasma. para la medida de la densidad electrónica del plasma. Se exponen con un cierto detalle los principios que rigen la medida Se exponen con un cierto detalle los principios que rigen la medida de densidades electrónicas y la forma de obtener el perfil de densidad de densidades electrónicas y la forma de obtener el perfil de densidad del plasma a partir de los datos experimentales. Se describe el inter ferómetro utilizado en el Tokamak TJ-1, analizando con detalle el fundel plasma a partir de los datos experimentales. Se describe el inter ferómetro utilizado en el Tokamak TJ-1, analizando con detalle el funcionamiento de cada uno de los circuitos que constituyen la cadena de cionamiento de cada uno de los circuitos que constituyen la cadena de medida, exponiéndose finalmente en dos apéndices los principios que ri medida, exponiendose finalmente en dos apéndices los principios que ri gen el funcionamiento del klystron reflex y de los anillos híbridos. gen el funcionamiento del klystron reflex y de los anillos híbridos. CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: A14. Plasma Density, Plasma Diagnos CLASTFICACION INTS Y DESCRIPTORES: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation. tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation. J.E.N. 565 J.E.N. 565 Junta de Energía Nuclear, División de Fusión, Madrid, Junta de Energía Nuclear, División de Fusión, Madrid, "Determinación de la densidad de un plasma por "Determinación de la densidad de un plasma por interferometría de microondas".- El interferómetro interferometría de microondas".- El interferómetro de 2 mm del Tokamak TJ-1. de 2 mm del Tokamak TJ-1. MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs. MARTIN, R.; MANERO, F. (1984) 46 pp. 23 figs. 23 refs. En este trabajo se describe el interferómetro de microondas utiliza-En este trabajo se describe el interferómetro de microondas utilizado en el Tokamak TJ-1, de la División de Fusión Termonuclear de la JEN, do en el Tokamak TJ-1, de la División de Fusión Termonuclear de la JEN, para la medida de la densidad electrónica del plasma. para la medida de la densidad electrónica del plasma. Se exponen con un cierto detalle los principios que rigen la medida Se exponen con un cierto detalle los principios que rigen la medida de densidades electrónicas y la forma de obtener el perfil de densidad de densidades electrónicas y la forma de obtener el perfil de densidad del plasma a partir de los datos experimentales. Se describe el inter del plasma a partir de los datos experimentales. Se describe el inter ferómetro utilizado en el Tokamak TJ-1, analizando con detalle el funferómetro utilizado en el Tokamak TJ-1, analizando con detalle el funcionamiento de cada uno de los circuitos que constituyen la cadena de cionamiento de cada uno de los circuitos que constituyen la cadena de medida, exponiéndose finalmente en dos apéndices los principios que ri medida, exponiéndose finalmente en dos apéndices los principios que ri gen el funcionamiento del klystron reflex y de los anillos hibridos. gen el funcionamiento del klystron reflex y de los anillos híbridos. CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: A14. Plasma Density. Plasma Diagnos tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation. tic. Interferometry. Interferometers. Microwaves Radiation.